

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number : 2002-344090
 (43) Date of publication of application : 29.11.2002

(51) Int.CI.

H01S 5/50
 G02F 1/313
 H01S 5/343
 H01S 5/40
 H04B 10/00

(21) Application number : 2001-142386

(71) Applicant : FUJITSU LTD

(22) Date of filing : 11.05.2001

(72) Inventor : SUGAWARA MITSURU

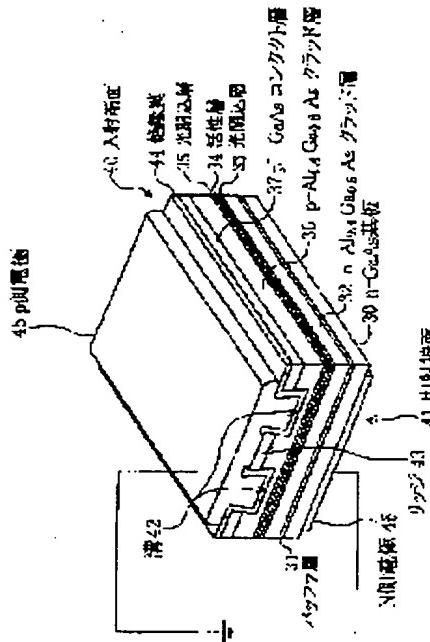
(54) METHOD AND APPARATUS FOR PROCESSING LIGHT SIGNAL

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method for processing a light signal which can operate at a high speed and which is also stable.

SOLUTION: The method for processing the light signal comprises steps of applying a bias voltage to a semiconductor region of a semiconductor optical amplifier having the semiconductor region, in which a plurality of quantum dots for confining carries in a three-dimensional manner are distributed, and injecting the carrier in the dots; steps of inputting an optical pulse signal having a bit speed of 2 Gb/s or higher to the amplifier, generating induced emission due to optical transition of the carries inside the dots, and amplifying the input optical pulse signal.

第1の実施例による半導体光増幅器



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-344090

(P2002-344090A)

(43)公開日 平成14年11月29日 (2002.11.29)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコト ⁸ (参考)
H 01 S 5/50	6 1 0	H 01 S 5/50	6 1 0 2 K 0 0 2
	6 3 0		6 3 0 5 F 0 7 3
G 02 F 1/313		G 02 F 1/313	5 K 0 0 2
H 01 S 5/343		H 01 S 5/343	
	5/40		5/40

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 18 頁) 最終頁に統く

(21)出願番号 特願2001-142386(P2001-142386)

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72)発明者 菅原 充

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74)代理人 100091340

弁理士 高橋 敬四郎

(22)出願日 平成13年5月11日 (2001.5.11)

最終頁に統く

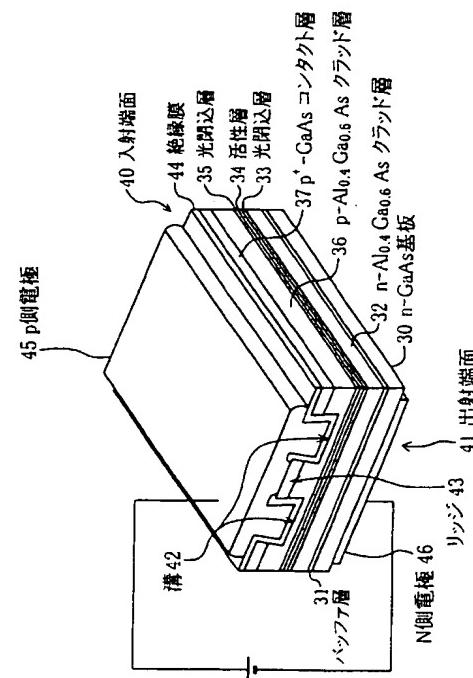
(54)【発明の名称】 光信号処理方法及び光信号処理装置

(57)【要約】

【課題】 高速動作可能かつ安定した光信号処理方法を提供することである。

【解決手段】 キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器の該半導体領域にバイアス電圧を印加して前記量子ドットにキャリアを注入する。半導体光増幅器に、ビット速度2Gbit/s以上の光パルス信号を入力し、前記量子ドット内のキャリアの光学遷移による誘導放出を生じさせ、入力された光パルス信号を増幅する。

第1の実施例による半導体光増幅器



【特許請求の範囲】

【請求項1】 キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器の該半導体領域にバイアス電圧を印加して前記量子ドットにキャリアを注入する工程と、
前記半導体光増幅器に、ビット速度 $2\text{Gb}/\text{s}$ 以上の光パルス信号を入力し、前記量子ドット内のキャリアの光学遷移による誘導放出を生じさせ、入力された光パルス信号を増幅する工程とを有する光信号処理方法。

【請求項2】 さらに、光パルス信号の、強度がしきい値以下の成分を吸収し、該しきい値以上の成分を通過させる光吸收飽和素子に、光パルス信号を入力し、該光吸收飽和素子により一部の光が吸収された光パルス信号を出力する工程を有し、
前記光パルス信号を増幅する工程において、前記光吸收飽和素子から出力された光パルス信号を前記半導体光増幅器に入力する請求項1に記載の光信号処理方法。

【請求項3】 キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器の該半導体領域にバイアス電圧を印加して前記量子ドットにキャリアを注入する工程と、
前記半導体光増幅器に、第1の波長の光パルス信号と、該第1の波長とは異なる第2の波長の連続光を入力する工程であって、該光パルス信号の光パルスが入力されることによって該半導体光増幅器の利得の低下を生じさせ、該連続光の出力波形を、該光パルス信号の波形に応じて変化させる工程とを有する光信号処理方法。

【請求項4】 キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する第1及び第2の半導体光増幅器の該半導体領域にバイアス電圧を印加して前記量子ドットにキャリアを注入する工程と、
前記第1及び第2の半導体光増幅器に、複数の光パルス信号が時分割多重された同一の多重化光パルス信号を入力すると共に、前記第1の半導体光増幅器にのみ、前記多重化光パルス信号に多重化されている特定の光パルス信号のタイムスロットに同期させて、制御用光パルス信号を入力する工程と、

前記第1及び第2の半導体光増幅器の各々から出力された多重化光パルス信号を干渉させ、該多重化光パルス信号から前記特定の光パルス信号を分離する工程とを有する光信号処理方法。

【請求項5】 キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器と、
前記半導体光増幅器に、第1の波長の光パルス信号と、該第1の波長とは異なる第2の波長の連続光とを入力する入力光学装置とを有する光信号処理装置。

【請求項6】 前記光パルス信号のパルスが入力されると、前記半導体光増幅器の利得飽和によって、前記第2の波長の連続光の利得が低下し、第2の波長の出力光の

強度が低下するように、前記光パルス信号のピークパワーと前記連続光のパワーが選択されている請求項5に記載の光信号処理装置。

【請求項7】 キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する第1及び第2の半導体光増幅器と、

前記第1及び第2の半導体光増幅器に、複数の光パルス信号が時分割多重された同一の多重化光パルス信号を入力する第1の光学装置と、

前記第1の半導体光増幅器にのみ、前記多重化光パルス信号に多重化されている光パルス信号のうち一部の光パルス信号のタイムスロットに同期させて、制御用光パルス信号を入力する第2の光学装置と、

前記第1及び第2の半導体光増幅器の各々から出力された多重化光パルス信号を干渉させ、該多重化光パルス信号から前記制御用光パルス信号に同期した光パルス信号を分離する干渉計とを有する光信号処理装置。

【請求項8】 キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する第1及び第2の半導体光増幅器と、

前記第1及び第2の半導体光増幅器に、光パルス信号を入力する第1の光学装置と、

前記第1の半導体光増幅器にのみ、制御用光パルス信号を入力する第2の光学装置と、

前記第1及び第2の半導体光増幅器の各々から出力された光パルス信号を干渉させ、該光パルス信号から、前記制御用光パルス信号のパルスに同期した光パルスを分離する干渉計とを有する光信号処理装置。

【請求項9】 入力光のうち強度がしきい値以下の成分を吸収し、しきい値を超えている成分を通過させる光吸收飽和素子と、

前記光吸收飽和素子に光パルス信号を入力する第1の光学装置と、

前記光吸收飽和素子から出力された光パルス信号が入力され、キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器とを有する光信号処理装置。

【請求項10】 入力光のうち強度がしきい値以下の成分を吸収し、しきい値を超えている成分を通過させる複数の光吸收飽和素子と、

キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する複数の半導体光増幅器と、前記複数の光吸收飽和素子と複数の半導体光増幅器とを継続接続する光導波路とを有する光信号処理装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、半導体光増幅器及び光信号処理装置に関し、特に、長距離大容量光通信に適し、高速動作可能な半導体光増幅器及び光信号処理装置に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、大容量光通信網で用いられる光通信方式として、波長多重 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) 技術が開発された。さらに、大容量光通信を目指した光時分割多重 (Optical Time Division Multiplexing : OTDM) 技術や、WDM技術とOTDM技術とを組み合わせた時間波長分割多重 (Time Wavelength Division Multiplexing : TWDM) 技術が提唱され、研究が進められている。

【0003】図1に、大容量光通信網の概念図を示す。複数のノード1が、光伝送路（光ファイバ）2で接続されている。各ノード1は、光信号の再生、ドロップ、アド（追加）、及びルーティングを行う。光信号の再生は、通常、増幅（Regenerating）、整形（Reshaping）、及びリタイミング（Retiming）の機能から構成され、3R再生と呼ばれる。

【0004】従来の光通信方式では、各ノードで、光信号を一旦電気信号に変換し、電気信号の状態で信号処理を行い、処理された電気信号を光信号に再変換していた。しかし、電気信号の応答速度は、電子素子のキャリア移動度やC.R.時定数によって制限されるため、光信号の応答速度に比べて遅い。例えば、光信号を電気信号に変換する方式の信号処理の速度限界は、10～40Gb/sである。これ以上の速度で信号処理を行うためには、OTDM信号を光のままで信号処理する全光信号処理技術が不可欠である。

【0005】図2に、OTDM信号を光のままで処理する光ノードのブロック図の一例を示す。光ノード1は、再生機能ブロック5、ドロップ機能ブロック10、アド機能ブロック20、及びルーティング機能ブロック25により構成される。

【0006】複数のチャンネルが時分割多重された光信号が、再生機能ブロック5の増幅器6に入力される。増幅器6は、光信号を増幅する。整形器7が、増幅された光信号の波形を整形する。リタイミング装置8が、波形整形された光信号のパルスの時間的なずれを補正し、パルスを時間軸上の正規の位置に戻す。クロック抽出器9が、増幅された光信号からクロック信号を抽出し、光ノード内の各装置にクロック信号を供給する。

【0007】リタイミング処理された光信号が、ドロップ機能ブロック10内のパルス分岐装置11及びアド機能ブロック20内の光ゲート21に入力される。パルス分岐装置11で分岐された光信号が、ヘッダ解読器12及び遅延メモリ13に入力される。ヘッダ解読器12は、チャンネルごとに光信号のヘッダ情報を解読する。遅延メモリ13は、光信号を所定の時間だけ遅延させる。デマルチブレクサ14が、遅延された光信号をチャンネルごとに分離（デマルチブレクス）し、当該ノードでドロップせざるべきチャンネルの光信号を取り出す。

【0008】アド機能ブロック20の光ゲート21は、

リタイミング処理された光信号から、当該ノードでドロップされたチャンネルのタイムスロットを空き状態にする。マルチブレクサ22が、当該ノードで追加する光信号を多重化する。光ゲート21を通過した光信号の空きタイムスロットに、多重化された光信号が追加される。さらに、ヘッダ形成器23が、当該ノードで追加された光信号のヘッダを形成し、光ゲート21を通過した光信号の所定のタイムスロットにヘッダ情報を追加する。

【0009】ヘッダ情報の追加された光信号が波長変換器24に入力されると共に、ルーティング機能ブロック25に入力される。波長変換器24は、入力された光信号の波長を変換し、ルーティング機能ブロック25に入力する。ルーティング機能ブロック25は、入力された光信号のチャンネルごとのルーティング情報に基づいて、各チャンネルの光信号を伝送すべき次の光ノードに振り分ける。

【0010】光ノードのこれらの機能を実現する素子のうち、光増幅器6及び整形器7の2つの機能を有する素子（この2つの機能を有する素子は、2R素子と呼ばれる）、複数のチャンネルが時分割多重された光信号をチャンネルごとの信号に分離する光デマルチブレクサ14、及び波長変換器24の実現が、特に望まれている。

【0011】このような機能は、半導体光増幅器（Semiconductor Optical Amplifier : SOA）で実現することが可能である。

【0012】図15に、従来のSOAの概略斜視図を示す。従来のSOAは、光増幅のための利得を有する活性層200を、p型半導体層201とn型半導体層202とで挟んだ構造とされている。活性層200は、例えば両側の半導体層よりもバンドギャップの小さな半導体材料で形成された半導体層、または量子井戸層で構成される。

【0013】活性層200に順方向バイアスを印加すると、活性層200内のキャリア分布が反転分布状態になる。活性層200の1つの端面から活性層200内に光信号203が入射すると、光信号が活性層200内で増幅され、反対側の端面から出射する。次に、図16及び図17を参照して、半導体光増幅器を光信号処理装置に適用した場合の動作原理について説明する。

【0014】図16は、半導体光増幅器を2R素子として動作させる場合の構成を示す。長距離伝送された光信号が、半導体光増幅器210に入力される。伝送過程での様々な要因、例えばノイズの発生、伝送システムへの外乱、分岐等により、光信号のパルス強度がばらついている。半導体光増幅器210の入力信号の光強度に対する出力信号の光強度の関係は、飽和特性を有する。これを利得飽和と呼ぶ。

【0015】このような利得飽和を有する半導体光増幅器210に、パルス強度のばらついた光信号が入力されると、光信号が増幅されると共に、出力信号のパルス強

度が均一に近づく。すなわち、半導体光増幅器210は、光増幅と波形整形の機能を有する。

【0016】図17は、半導体光増幅器を波長変換器として動作させる場合の構成を示す。半導体光増幅器210に、波長 λ_1 の光信号 s_{ig1} と、波長 λ_2 の光信号 s_{ig2} とが入力される。光信号 s_{ig1} は光パルス列で構成されており、光信号 s_{ig2} は連続光である。光信号 s_{ig1} のパルス及び光信号 s_{ig2} の双方が入力されると、半導体光増幅器210の利得が飽和するように、光信号の強度及び半導体光増幅器210の増幅特性が調整されている。

【0017】光信号 s_{ig1} のパルスのオンオフによって、光信号 s_{ig2} の利得が変動するため、光信号 s_{ig2} の強度が変調を受ける。このため、半導体光増幅器210から出力される波長 λ_2 の光信号 s_{ig2} は、入力された光信号 s_{ig1} の波形を反転させた波形になる。すなわち、波長 λ_1 の光信号 s_{ig1} は、波長 λ_2 の光信号 s_{ig2} に変換されたことになる。

【0018】上述のように、半導体光増幅器を2R素子や波長変換器として用いることができる。しかし、従来の半導体光増幅器は応答速度が遅く、処理可能な周波数は、高々1Gb/s程度である。その理由について、以下に説明する。

【0019】半導体光増幅器中を伝搬する光パルス $S(z, T)$ のレート方程式は、

【0020】

【数1】

$$\frac{\partial S(z, T)}{\partial z} = (\Gamma g - \alpha_{loss}) S(z, T) \quad \dots (1)$$

と表される。ここで、 z は、半導体光増幅器の導波路内の光の伝搬方向に関する座標、 T は時間、 g は半導体光増幅器の活性層の利得、 α_{loss} は導波路の損失、 Γ は光閉込係数を表す。活性層の利得 g は、キャリア密度によって決まる。キャリア密度 N のレート方程式は、

【0021】

【数2】

$$\frac{dN}{dT} = \frac{N_0 - N}{\tau_r} - \Gamma S(z, T) g \quad \dots (2)$$

$$N_0 = \frac{\tau_r J}{ed}$$

と表される。ここで、 τ_r はキャリアの再結合時間、 J は電流密度、 d は活性層の厚さ、 e は電子の持つ電荷を表す。本願発明者の行った評価実験によると、利得 g は、

【0022】

【数3】

$$g = A (L - L_z)^2 + B (L - L_z)^3 \quad \dots (3)$$

と近似できることがわかった。ここで、 L は半導体光増幅器の長さを表し、各定数は下記のように定義される。

【0023】

$$A = 3 P / (L_z - L_p)^2$$

$$B = 2 P / (L_z - L_p)^3$$

$$L_z = L_{z0} - C_0 (N - N_0)$$

$$L_p = L_0 - B_0 (N - N_0)$$

$$P = A_0 (N - N_0) + A_0 N_0 e \times p (-N/N_0)$$

$$A_0 = 3.0 \times 10^{-16} [cm^2]$$

$$B_0 = 3.0 \times 10^{-20} [\mu m \cdot cm^3]$$

$$L_{z0} = 1.65 [\mu m]$$

$$L_0 = 1.60 [\mu m]$$

$$N_0 = 7.0 \times 10^{17} [cm^{-3}]$$

式(3)を式(2)に代入することにより、キャリア密度 N に関する微分方程式が得られる。この微分方程式を解くことにより、キャリア密度 N の時間変動グラフが得られる。時間変動するキャリア密度 N を式(3)に代入することにより、利得 g の時間変動グラフが得られる。

【0024】図18は、時刻0からパルス幅10psの光パルスを半導体光増幅器に入力したときの利得 g の変動の計算結果を示す。横軸は時刻0からの経過時間を単位「ps」で表し、縦軸は利得 g を単位「cm^-1」で表す。なお、評価対象の半導体光増幅器の活性層は、バンドギャップ1.55μm相当のInGaAsPであり、動作温度は295Kである。図18には、半導体光増幅器に流す電流密度が4kA/cm^2、8kA/cm^2、及び16kA/cm^2のときの利得 g を示す。光パルスが印加されている期間は、伝導帯中の電子の光学遷移によりキャリア密度が減少するため、利得 g も減少する。

【0025】図19は、パルス幅10psの光パルス信号を、ビット速度40Gb/sで半導体光増幅器に入力したときの利得 g の時間変動を示す。横軸は経過時間を単位「ns」で表し、縦軸は利得 g を単位「cm^-1」で表す。なお、活性層の構成及び動作温度は、図18の場合と同様であり、電流密度は8kA/cm^2である。光パルスが入力されている期間は利得 g が減少する。光パルスが入力されていない期間は、活性層内にキャリアが補給されるため、利得 g が上昇する。

【0026】ところが、利得の応答速度が遅いため、利得変動が40Gb/sの光信号に追随できていないことがわかる。図19のグラフから、利得 g の応答時間は約0.3ns程度であることがわかる。この応答時間から、従来の半導体光増幅器の動作周波数は、高々2Gb/sであることがわかる。

【0027】図20に、従来の半導体光増幅器にパルス幅10ps、ビット速度40Gb/sの光信号を入力したときの、入力信号と出力信号との光強度を示す。横軸は経過時間を単位「ps」で表し、縦軸は光出力を単位「mW」で表す。なお、半導体光増幅器の構成は、図1

8の場合と同様であり、電流密度は 8 kA/cm^2 、動作温度は 295K 、活性層の長さは $600\mu\text{m}$ とした。利得の応答特性が悪いため、出力信号の各パルスのピークパワーが徐々に低下し、一定になるまでに長時間をしている。このようなピークパワーの変動は、伝送エラーの原因になる。

【0028】次に、図21を参照して、従来の半導体光増幅器を用いた光信号分離装置（デマルチプレクサ）の動作原理及び構成例を示す。

【0029】図21(A)に示すように、半導体光増幅器210に、制御用光信号 s_{ig_3} と光信号 s_{ig_4} とが入力される。光信号 s_{ig_4} は、例えばチャンネル#1～#4が時分割多重された信号である。光信号 s_{ig_4} のチャンネル#2のタイムスロットに合わせて制御信号 s_{ig_3} のパルスが半導体光増幅器210に入力される。

【0030】制御信号 s_{ig_3} のパルスと光信号 s_{ig_4} のパルスとが重なると、半導体光増幅器210の活性層内のキャリア密度が大きく減少し、屈折率が変化する。このため、光信号 s_{ig_4} のチャンネル#2のパルスの位相が変化する。図21(A)では、位相の変化したパルスにハッチを付している。半導体光増幅器210は、この位相変化がちょうどπになるように調整されている。

【0031】ところが、半導体光増幅器の応答特性が悪いため、光信号 s_{ig_4} のチャンネル#2のタイムスロットと同時に入力した制御信号 s_{ig_3} のパルスの影響が、光信号 s_{ig_4} のチャンネル#3以降のタイムスロットにも及んでしまう。このため、チャンネル#3や#4のパルスの位相も変化してしまう。

【0032】図21(B)は、この問題を解決することが可能な光信号分離装置の構成例を示す。マッハゼンダ（Mach-Zehnder）型干渉計の一方の光路に第1の半導体光増幅器210Aが挿入され、他方の光路に第2の半導体光増幅器210Bが挿入されている。半導体光増幅器210A及び210Bの双方に、4チャンネルの信号が時分割多重された光信号 s_{ig_4} が入力される。

【0033】第1の半導体光増幅器210Aに、制御用光信号 s_{ig_3} が入力され、第2の半導体光増幅器210Bに、遅延された制御信号 s_{ig_3} が入力される。第1の半導体光増幅器210Aに入力される制御信号 s_{ig_3} は、光信号 s_{ig_4} のチャンネル#2のタイムスロットに時間的に一致するパルスを有する。第2の半導体光増幅器210Bに入力される制御信号 s_{ig_3} は遅延されており、制御信号 s_{ig_3} のパルスは、光信号 s_{ig_4} のチャンネル#3のタイムスロットに時間的に一致する。

【0034】第1の半導体光増幅器210Aにおいては、制御信号 s_{ig_3} のパルスの影響が、チャンネル#2以降のチャンネルのパルスにも及ぶため、出力された

光信号 s_{ig_5} のチャンネル#2～#4のパルスの位相が変化する。第2の半導体光増幅器210Bにおいては、制御信号 s_{ig_3} のパルスの影響が、チャンネル#3以降のチャンネルのパルスに及ぶ。このため、出力された光信号 s_{ig_6} のチャンネル#3及び#4のパルスの位相が変化する。図21(B)において、位相の変化したパルスにハッチが付されている。

【0035】光信号 s_{ig_5} と s_{ig_6} とが干渉を起こすことにより、マッハゼンダ型干渉計の一方の出力導波路211Aに、チャンネル#1、#3及び#4のパルスが現れ、他方の出力導波路211Bに、チャンネル#2のパルスが現れる。このようにして、時分割多重された光信号から、所望のチャンネルの信号を分離することができる。

【0036】

【発明が解決しようとする課題】上述のように、従来の半導体光増幅器を用いた光信号処理装置では、 2Gb/s 程度以上の高速伝送に対応することが困難である。

【0037】図21(B)に示した光信号分離装置においては、制御信号 s_{ig_3} を遅延させて第2の半導体光増幅器210Bに入力することにより、半導体光増幅器210Bの応答特性の低さを補償している。ところが、この補償方法を用いた光信号分離装置は、構成が複雑である上に、微妙な調整が必要であり安定した動作を行わせることが困難である。

【0038】本発明の目的は、高速動作可能かつ安定した光信号処理方法及び光信号処理装置を提供することである。

【0039】

【課題を解決するための手段】本発明の一観点によると、キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器の該半導体領域にバイアス電圧を印加して前記量子ドットにキャリアを注入する工程と、前記半導体光増幅器に、ビット速度 2Gb/s 以上の光パルス信号を入力し、前記量子ドット内のキャリアの光学遷移による誘導放出を生じさせ、入力された光パルス信号を増幅する工程とを有する光信号処理方法が提供される。

【0040】本発明の他の観点によると、キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器の該半導体領域にバイアス電圧を印加して前記量子ドットにキャリアを注入する工程と、前記半導体光増幅器に、第1の波長の光パルス信号と、該第1の波長とは異なる第2の波長の連続光を入力する工程であって、該光パルス信号の光パルスが入力されることによって該半導体光増幅器の利得の低下を生じさせ、該連続光の出力波形を、該光パルス信号の波形に応じて変化させる工程とを有する光信号処理方法が提供される。

【0041】本発明のさらに他の観点によると、キャリ

アを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する第1及び第2の半導体光増幅器の該半導体領域にバイアス電圧を印加して前記量子ドットにキャリアを注入する工程と、前記第1及び第2の半導体光増幅器に、複数の光パルス信号が時分割多重された同一の多重化光パルス信号を入力すると共に、前記第1の半導体光増幅器にのみ、前記多重化光パルス信号に多重化されている特定の光パルス信号のタイムスロットに同期させて、制御用光パルス信号を入力する工程と、前記第1及び第2の半導体光増幅器の各々から出力された多重化光パルス信号を干渉させ、該多重化光パルス信号から前記特定の光パルス信号を分離する工程とを有する光信号処理方法が提供される。

【0042】上述のように、量子ドット内のキャリアの光学遷移を利用することにより、半導体光増幅器の応答速度を高めることができる。

【0043】本発明のさらに他の観点によると、キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器と、前記半導体光増幅器に、第1の波長の光パルス信号と、該第1の波長とは異なる第2の波長の連続光とを入力する入力光学装置とを有する光信号処理装置が提供される。

【0044】第1の波長の光パルス信号のパルスが入力されると、利得飽和が生じ、第2の波長の連続光の利得が低下する。これにより、第2の波長の光信号の出力強度が、第1の波長の光パルス信号の波形に応じて変動する。結果的に、第1の波長から第2の波長に波長変換が行われる。

【0045】本発明のさらに他の観点によると、キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する第1及び第2の半導体光増幅器と、前記第1及び第2の半導体光増幅器に、複数の光パルス信号が時分割多重された同一の多重化光パルス信号を入力する第1の光学装置と、前記第1の半導体光増幅器にのみ、前記多重化光パルス信号に多重化されている光パルス信号のうち一部の光パルス信号のタイムスロットに同期させて、制御用光パルス信号を入力する第2の光学装置と、前記第1及び第2の半導体光増幅器の各々から出力された多重化光パルス信号を干渉させ、該多重化光パルス信号から前記制御用光パルス信号に同期した光パルス信号を分離する干渉計とを有する光信号処理装置が提供される。

【0046】本発明のさらに他の観点によると、キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する第1及び第2の半導体光増幅器と、前記第1及び第2の半導体光増幅器に、光パルス信号を入力する第1の光学装置と、前記第1の半導体光増幅器にのみ、制御用光パルス信号を入力する第2の光学装置と、前記第1及び第2の半導体光増幅器の各々から出力された光パルス信号を干渉させ、該光パルス信号から、

前記制御用光パルス信号のパルスに同期した光パルスを分離する干渉計とを有する光信号処理装置が提供される。

【0047】量子ドット内のキャリアの光学遷移を利用することにより、半導体光増幅器の応答速度を高めることができる。このため、制御用光パルス信号を入力することによって、所望のタイムスロットのパルスのみの位相を変化させることができる。これにより、半導体光増幅器の応答速度の低さを補償しなくてもよいため、第2の半導体光増幅器に制御用光パルス信号を入力する必要がなく、装置構成を簡単化することができる。また、動作点の微妙な調整を行う必要がない。

【0048】本発明のさらに他の観点によると、入力光のうち強度がしきい値以下の成分を吸収し、しきい値を超えている成分を通過させる光吸収飽和素子と、前記光吸収飽和素子に光パルス信号を入力する第1の光学装置と、前記光吸収飽和素子から出力された光パルス信号が入力され、キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する半導体光増幅器とを有する光信号処理装置が提供される。

【0049】光吸収飽和素子で、入力光のバックグラウンドノイズを除去することができる。これにより、増幅された光信号のS/N比を高めることができる。

【0050】本発明のさらに他の観点によると、入力光のうち強度がしきい値以下の成分を吸収し、しきい値を超えている成分を通過させる複数の光吸収飽和素子と、キャリアを3次元的に閉じ込める複数の量子ドットが分布した半導体領域を有する複数の半導体光増幅器と、前記複数の光吸収飽和素子と複数の半導体光増幅器とを継続接続する光導波路とを有する光信号処理装置が提供される。

【0051】複数の光吸収飽和素子と複数の半導体光増幅器とを継続接続することにより、波形整形効果を高めることができる。

【0052】

【発明の実施の形態】図3に、本発明の第1の実施例による半導体光増幅器の斜視図を示す。厚さ300μのn型GaAs基板30の表面上に、n型のGaAsからなる厚さ1μmのバッファ層31が形成されている。バッ40 ファ層31の上に、n型のAl_{0.4}Ga_{0.6}Asからなる厚さ0.5μmのクラッド層32が形成されている。クラッド層32の上に、下側光閉込層33、活性層34、及び上側光閉込層35がこの順番に積層されている。この3層の詳細な構成については、図4を参照して後述する。

【0053】上側光閉込層35の上に、p型のAl_{0.4}Ga_{0.6}Asからなる厚さ1.0μmのクラッド層36が形成されている。クラッド層36の上に、p型のGaAsからなる厚さ0.2μmのコンククト層37が形成されている。n型基板30、n型クラッド層32、p型

クラッド層36、p型コンタクト層37の不純物濃度はすべて約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。

【0054】基板表面の法線に平行な視線で見たとき、これらの層が積層された積層構造体の形状は、ほぼ長方形である。長方形の1つの辺に対応する端面が入射端面40を画定し、その反対側の端面が出射端面41を画定する。

【0055】コンタクト層37に、入射端面40から出射端面41までのびた2本の溝42が形成されている。

2本の溝42は、ほぼ平行に配置され、p型クラッド層36の内部まで達している。2本の溝42は、両者の間にリッジ43を画定する。酸化シリコンからなる絶縁膜44が、リッジ43の上面を除くコンタクト層37の上面、及び溝42の内面を被覆する。

【0056】絶縁膜44及びリッジ43の上面に、p側電極45が形成されている。p側電極45は、例えばAuZn合金等で形成され、リッジ43の上面においてコンタクト層37にオーム接觸する。n型基板30の裏面上にn側電極46が形成されている。n側電極46は、例えばAuGe合金で形成され、基板30にオーム接觸する。

【0057】図4(A)に、下側光閉込層33、活性層34、及び上側光閉込層35の断面図を示す。下側光閉込層33及び上側光閉込層35はGaAsで形成され、その厚さは0.1μmである。活性層34は、10層の量子ドット層34Aと9層のGaAs層34Bとが交互に積層された構造を有する。量子ドット層34Aの各々の厚さは25nmである。GaAs層34Bの各々の厚さは25nmである。

【0058】量子ドット層34Aの各々は、下地表面上に不規則に分布したInAsからなる多数の量子ドット34C、及び下地表面のうち量子ドット34Cの配置されていない領域を覆うInGaAsからなるウェッティング層34Dにより構成される。各量子ドット34Cの面内方向の大きさは約20nmである。量子ドット34Cは、キャリアを3次元的に閉じ込める。

【0059】次に、図3に示した半導体増幅器の製造方法を説明する。クラッド層32からコンタクト層37までの各層は、成長温度550°Cの条件で、分子線エピタキシ(MBE)により形成される。GaAsからなる下地表面上にInGaAsを成長させると、歪エネルギーを最小にするように、図4に示したような量子ドット34Cが自己形成される。

【0060】溝42は、エッチャントとしてリン酸、過酸化水素水及び水の混合液を用いたエッチングにより形成される。絶縁膜44は、化学気相成長(CVD)またはスパッタリングにより形成される。p側電極45及びn側電極46は、真空蒸着により形成される。

【0061】次に、図3に示した第1の実施例による半導体光増幅器の動作原理について説明する。

【0062】図4(B)に、量子ドット34Cのエネルギーバンド図を示す。図4(B)には、j番目の量子ドット34C_j及びj+1番目の量子ドット34C_{j+1}に相当するエネルギー準位が表されている。量子ドット34Cの大きさは、伝導帯中の電子の波長と同程度であるため、量子ドット34C内の電子のエネルギーは量子化される。このため、量子ドット34C_jの伝導帯中の電子のエネルギー準位が離散的に分布する。2次励起状態以上の各状態のエネルギー差は、基底状態N_jと1次励起状態N_{e(j)}とのエネルギーの差、及び1次励起状態N_{e(j)}と2次励起状態とのエネルギー差に比べて十分小さい。このため、2次励起状態以上の複数の状態は連続状態N_{c(j)}とみなすことができる。ウェッティング層34Dの伝導帯には、連続状態N_wが存在する。下記の考察では、量子ドットの大きさのばらつき(不均一広がりと呼ばれる)や量子ドットの各々の利得のばらつき(均一広がりと呼ばれる)が考慮される。

【0063】多数の量子ドット34Cを含む活性層34の利得Gは、

【0064】

【数5】

$$G = \sum_j g_j \quad \dots (5)$$

と表される。ここで、g_jはj番目の量子ドット34C_jの利得であり、下記の式で表される。

【0065】

$$\begin{aligned} \text{【数6】 } g_j &= A_j (N_j - N_{e0} G_j) \quad \dots (6) \\ A_j &= 2\pi e^2 / (\epsilon_0 c n_r m_0^2) \times (|P|^2 / E_0) \times \\ &B(\omega - \omega_j) \end{aligned}$$

$$G_j = G (\omega_j - \omega_0) \Delta \omega$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、cは真空中の光速、eは電子の持つ電荷、n_rは半導体光増幅器中の光の導波部分の平均屈折率、m₀は電子の静止質量、Pは量子ドットの光学遷移の行列要素、E₀は量子ドットの基底状態から荷電子帯の基底準位への光学遷移エネルギーである。 ω_0 は、エネルギーE₀に対応する角周波数であり、プランク定数をhとして、

【0066】

$$\text{【数7】 } \omega_0 = (2\pi) E_0 / h$$

と表される。G($\omega_j - \omega_0$)は量子ドットの光学遷移エネルギーの分布を表す関数である。ここで、複数の量子ドットは、その光学遷移エネルギーに応じてグループ分けされており、量子ドットは指数jで特定されている。 $\Delta \omega$ は、グループ分けされた量子ドットの各グループの角周波数幅を表す。

【0067】図3に示したp側電極45及びn側電極46に順方向バイアスを印加すると、キャリアが活性層34内に注入される。キャリアは、まず量子箱34Cを取り巻くウェッティング層34D内に注入され、量子ドット34Cの高次の励起状態に捕捉される。j番目の量子

ドット $34C_j$ に捕捉されたキャリアは、励起状態 $N_{e,j}$ 、基底状態 N_j へと緩和していく。

【0068】図4(B)に示したエネルギー準位モデルでは、量子ドット $34C$ へのキャリアの注入過程を下記のようなレート方程式で表すことができる。

【0069】ウェッティング層 $34D$ 内においては、レート方程式は、

【0070】

【数8】

$$\frac{dN_w}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N_w}{\tau_{w \rightarrow c}} - \frac{N_w}{\tau_{wr}} + \frac{\sum N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow w}} \quad \dots (8)$$

$$\frac{dN_{c,j}}{dt} = \frac{G_j N_w}{\tau_{w \rightarrow c,j}} + \frac{N_j}{\tau_{g \rightarrow c,j}} + \frac{N_{e,j}}{\tau_{e \rightarrow c,j}} - \frac{N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow g,j}} - \frac{N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow e,j}} - \frac{N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow w}} \quad \dots (9)$$

と表される。 N_j は、 j 番目の量子ドットの基底状態を占める電子密度を表す。 τ_{cr} は、量子ドットの連続状態を占めるキャリアの再結合時間を表す。

【0073】 j 番目の量子ドット $34C_j$ の励起準位 $N_{e,j}$

$$\frac{dN_{e,j}}{dt} = \frac{N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow e,j}} + \frac{N_j}{\tau_{g \rightarrow e,j}} - \frac{N_{e,j}}{\tau_{er}} - \frac{N_{e,j}}{\tau_{e \rightarrow g,j}} - \frac{N_{e,j}}{\tau_{e \rightarrow c,j}} \quad \dots (10)$$

と表される。 τ_{er} は、量子ドットの励起状態を占めるキャリアの再結合時間を表す。

【0075】 j 番目の量子ドット $34C_j$ の基底状態 N_j のレート方程式は、

【0076】

【数11】

$$\frac{\partial N_j}{\partial T} = \frac{N_{j0} - N_j}{\tau_{eff,j}} - \Gamma_n \sum_m \bar{g}_{mn}(N_j) S_{mn}(z, T) \quad \dots (11) \quad 30$$

$$N_{j0} = \left[\frac{N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow g,0}} + \frac{N_{e,j}}{\tau_{e \rightarrow g,0}} \right] \tau_{eff,j} \quad \dots (12)$$

$$\tau_{eff,j}^{-1} = \frac{N_{c,j}}{2N_D G_j \tau_{c \rightarrow g,0}} + \frac{N_{e,j}}{2N_D G_j \tau_{e \rightarrow g,0}} + \frac{1}{\tau_{g \rightarrow c,j}} + \frac{1}{\tau_{g \rightarrow e,j}} + \frac{1}{\tau_r} \quad 30$$

と表される。式(12)中の緩和時間 τ の添え字の0は、キャリア密度が0の時の緩和時間を表す。光パルス

$S_{mn}(z, T)$ の伝搬方程式は、

$$\frac{\partial S_{mn}(z, T)}{\partial z} = \left[\Gamma_n \sum_j \bar{g}_{mn}(N_j) - \alpha_{loss} \right] S_{mn}(z, T) \quad \dots (13)$$

と表される。

【0080】上述のレート方程式において、各緩和レートは下記の式で表される。

【0081】

【数14】

と表される。ここで、 $\tau_{a \rightarrow b,j}$ は j 番目の量子ドットの状態 a から状態 b への緩和レートである。添え字の w, c, e, g は、それぞれウェッティング層の連続状態、量子ドットの連続状態、励起状態、お呼び基底状態を示す。 τ のオーバーパーは、緩和レートの平均値を表す。 τ_{wr} は、ウェッティング層内のキャリアの再結合時間を表す。 N_w は、ウェッティング層内の連続状態を占める電子密度を表し、 $N_{a,j}$ は、 j 番目の量子ドットの状態 a を占める電子密度を表す。

【0071】 j 番目の量子ドット $34C_j$ の連続準位 $N_{c,j}$ のレート方程式は、

【0072】

【数9】

$$\frac{dN_{c,j}}{dt} = \frac{N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow g,j}} - \frac{N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow e,j}} - \frac{N_{c,j}}{\tau_{c \rightarrow w}} \quad \dots (9)$$

e_j のレート方程式は、

【0074】

【数10】

と表される。ここで、添え字の m は、光の周波数を表す指数であり、 n は、導波路の横モード（光の進行方向に垂直な面内の電磁場分布）を表す指数である。

【0077】上記のレート方程式において、 N_{j0} は、

【0078】

【数12】

【0079】

【数13】

$$\tau_{w \rightarrow c,j}^{-1} = (1 - P_{c,j}) \tau_{w \rightarrow c,0}^{-1}$$

$$P_{c,j} = \frac{N_{c,j}}{2D_c G_j} \quad \dots (14)$$

【数15】

$$\tau_{c \rightarrow w}^{-1} = \left(1 - \frac{N_w}{2D_w}\right) \tau_{c \rightarrow w,0}^{-1} \quad \dots \quad (15)$$

【0083】

【数16】

$$\bar{\tau}_{w \rightarrow c}^{-1} = \sum_j (1 - P_{c,j}) G_j \tau_{w \rightarrow c,0}^{-1} \quad \dots \quad (16)$$

【0084】

【数17】

$$\tau_{c \rightarrow g,j}^{-1} = (1 - P_j) \tau_{c \rightarrow g,0}^{-1} \quad \dots \quad (17)$$

$$P_j = \frac{N_j}{2N_D G_j}$$

【0085】

【数18】

$$\tau_{g \rightarrow c,j}^{-1} = (1 - P_{c,j}) \tau_{g \rightarrow c,0}^{-1} \quad \dots \quad (18)$$

【0086】

【数19】

$$\tau_{c \rightarrow e,j}^{-1} = (1 - P_{e,j}) \tau_{c \rightarrow e,0}^{-1}$$

$$P_{e,j} = \frac{N_{e,j}}{2D_e G_j} \quad \dots \quad (19)$$

【0087】

【数20】

$$\tau_{e \rightarrow c,j}^{-1} = (1 - P_{c,j}) \tau_{e \rightarrow c,0}^{-1} \quad \dots \quad (20)$$

【0088】

【数21】

$$\tau_{e \rightarrow g,j}^{-1} = (1 - P_j) \tau_{e \rightarrow g,0}^{-1} \quad \dots \quad (21)$$

【0089】

【数22】

$$\tau_{g \rightarrow e,j}^{-1} = (1 - P_{e,j}) \tau_{g \rightarrow e,0}^{-1} \quad \dots \quad (22)$$

と表される。 D_w はウェッティング層の単位面積あたりの状態数、 D_c は量子ドットの連続状態の単位面積あたりの状態数、 D_e は励起状態の単位面積あたりの状態数、 N_D は量子ドットの密度である。

【0090】上記理論式を用いて、図3に示した半導体光増幅器の特性を計算した。計算に用いたパラメータは、以下の通りである。

【0091】

$$\begin{aligned} \text{【数23】 } \tau_{c \rightarrow g,0} &= \tau_{e \rightarrow g,0} = \tau_{g \rightarrow e,0} = 10 \text{ p s} \\ \tau_{w \rightarrow c,0} &= 1 \text{ p s} \\ \tau_{g \rightarrow c,0} &= 202 \text{ p s} \\ \tau_{g \rightarrow e,0} &= 27 \text{ p s} \end{aligned}$$

$$\tau_{e \rightarrow c,0} = 74 \text{ p s}$$

$$\tau_{c \rightarrow w,0} = \infty$$

$$N_D = 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$$

$$D_w = 40 N_D$$

$$D_c = 20 N_D$$

$$D_e = 6 N_D$$

$$\Gamma = 1.5\%$$

緩和時間は、ジャーナルオブアプライドフィジクス (1997年第81巻第7895頁) のウスクフらの論文

10 (A. V. Uskov, F. Adler, H. Schweizer, and M. H. P. ikuhn, J. Appl. Phys. 81(1997)7895) に記載された理論計算に基づいている。

【0092】図5は、第1の実施例による半導体光増幅器の利得スペクトルの電流密度依存性を示す。横軸は入射光のエネルギーを、基底状態のキャリアの光学遷移波長に相当するエネルギーを0 m eVとした相対値で表し、縦軸は利得を単位「cm⁻¹」で表す。基底状態及び励起状態の光学遷移波長に対応する位置に利得のピークが現れている。以下の説明では、入射光の波長が基底状態の光学遷移波長に一致する場合について説明する。

【0093】図6は、パルス幅10 p s、ピークパワー40 mWの光パルスが、第1の実施例による半導体光増幅器に入射したときの利得の時間変化を示す。横軸は、光パルスの入射時からの経過時間を単位「p s」で表し、縦軸は利得を単位「cm⁻¹」で表す。図6は、従来の半導体光増幅器の場合の図18に示した利得変動特性に対応する。

【0094】図6に示したように、半導体光増幅器に光パルスが入射すると、利得が急激に低下し、光パルスが通過した後は、利得が急激に回復している。利得の応答時間は約1 p s程度である。図6と図18とを比較すると、第1の実施例の半導体光増幅器の利得の応答時間は、従来の半導体光増幅器のそれに比べて著しく短いことがわかる。

【0095】図7は、電流密度16 k A/cm²の条件下で、パルスの繰り返し周波数が40 G b/sの光信号が入射したときの、第1の実施例による半導体光増幅器の利得の応答特性を示す。横軸は経過時間を単位「n s」で表し、縦軸は利得を単位「cm⁻¹」で表す。なお、図7は、従来の半導体光増幅器の図19の利得応答特性に対応する。

【0096】従来の半導体光増幅器では、図19に示したように、利得変動が光信号の変化に追随できていなかった。これに対し、第1の実施例による半導体光増幅器の場合には、光パルスの各々について利得飽和が生じ、利得変動が光信号の変化に追随していることがわかる。

【0097】図8は、電流密度8 k A/cm²の条件下で、パルス幅10 p s、ビット速度40 G b/s、ピークパワー1 mWの光信号を第1の実施例による半導体光増幅器に入射させたときの入力光信号と出力光信号との

強度の時間変動を示す。横軸は経過時間を単位「 μs 」で表し、縦軸は光強度を単位「mW」で表す。なお、半導体光増幅器の光伝搬方向の長さは $600\mu m$ とした。曲線 I_i 及び I_o が、それぞれ入力光信号及び出力光信号の光強度を示す。

【0098】図20に示した従来の半導体光増幅器の場合には、利得の応答速度が遅いため、出力光信号のパルスのピークパワーが安定しなかった。これに対し、第1の実施例による半導体光増幅器の場合には、図8に示したように、出力光信号のパルス列の各パルスのピークパワーがほぼ揃っている。これにより、エラーの生じにくい伝送を行うことが可能になる。なお、電流密度を増やせば、出力光の各パルスのピークパワーを、より均一に近づけることができるであろう。

【0099】次に、図9を参照して、従来の半導体光増幅器と第1の実施例による半導体光増幅器の動作原理の相違について説明する。

【0100】図9に示した左側の列のグラフが、従来の半導体光増幅器の利得スペクトルを表し、右側の列のグラフが、第1の実施例による半導体光増幅器の利得スペクトルを表す。最上段のグラフが、定常状態における利得スペクトルを表し、第2段目のグラフが、光パルスが入射した直後の利得スペクトルを表し、第3段目のグラフが、光パルスが通過した後の利得スペクトルを表し、第4段目のグラフが、利得が回復した後の利得スペクトルを表す。

【0101】従来の半導体光増幅器の場合には、活性層内の電子のエネルギー準位は連続的に分布する。このため、利得スペクトルは、活性層のバンドギャップに対応するエネルギーを含むブロードな形状を示す。光パルスが入射すると、誘導放出により、入射光のエネルギーに対応するエネルギー状態を占める電子の密度が低下する。これにより、当該エネルギーに対応する利得も低下する。

【0102】ところが、活性層内のエネルギー準位が連続的に分布しているため、電子密度の低下したエネルギー準位に、他のエネルギー準位から瞬時に電子が補充される。連続的な状態を占める電子の緩和時間は 100 f s 程度であり、極めて短い。このため、利得スペクトル内にスペクトルホールが現れない。入射光のパワーが、通常の光通信で使用される数十mW程度である場合、誘導放出によって減少する電子数は僅かであるため、利得が全体的に少しだけ低下し、利得飽和は生じない。

【0103】誘導放出によって減少した電子は、電極から注入されるキャリアによって補充される。キャリアが補充されるまで、利得は回復しない。このため、光パルスが通過した直後の利得は低下したままである。電子密度が定常状態の値に戻ると、利得も回復する。この利得が回復するまでの時間は、約 0.5 n s 程度である。

【0104】第1の実施例による半導体光増幅器の場合には、利得スペクトルに、量子ドット内の基底状態及び

励起状態に対応するピーク P_0 及び P_e が現れる。基底状態のエネルギーに相当する光パルスが入射すると、誘導放出により基底状態の電子密度が低下する。減少した電子が励起状態から補充されるまでに約 10 p s 程度の緩和時間が必要である。このため、入射光のエネルギーに対応する位置にスペクトルホールSHが現れる。

【0105】光パルスが通過すると、励起状態や連続状態からの緩和によって、基底状態のエネルギーに対応する利得が回復する。利得が回復するまでの時間は、 10 p s 程度である。励起状態や連続状態から基底状態へ電子が遷移することにより、励起状態や連続状態の電子密度が低下する。この電子密度の低下分は、電極から注入されるキャリアによって補充される。従って、約 0.5 n s 後に、励起状態のエネルギーに対応する利得が定常状態の値まで回復する。

【0106】このように、励起状態や連続状態の電子密度の回復には、比較的長時間を必要とする。しかし、励起状態や連続状態の状態数は、基底状態の状態数に比べて多い。これらの状態に、予め、十分な数の電子を注入しておけば、励起状態や連続状態の電子密度の回復の遅さは、基底状態のエネルギーの利得にほとんど影響を及ぼさない。

【0107】上述のように、第1の実施例による半導体光増幅器の場合には、利得飽和がスペクトルホールの発生によって生ずるため、その応答時間は極めて短い。また、利得の回復は、励起状態や連続状態から基底状態へ電子が補充されることによって生ずる。このため、利得の回復時間も極めて短い。

【0108】次に、図10を参照して本発明の第2の実施例による2R素子について説明する。

【0109】図10に示すように、第1の実施例による半導体光増幅器と同様の構成を有する半導体光増幅器50に、光信号が入力される。入力光信号のパルスのピークパワーには、ばらつきがある。半導体光増幅器50が利得飽和することにより、出力光信号のパルスのピークパワーが揃う。図6を参照して説明したように、利得飽和の生ずる時間が 1 p s 程度であるため、従来の半導体光増幅器では増幅及び整形が困難であった 2 G b/s 以上の光信号の増幅及び整形を行うことができる。第2の実施例による2R素子は、ビットレートが 10 G b/s 以上、特に、 40 G b/s 以上の光信号の増幅及び整形に適している。

【0110】次に、図11を参照して本発明の第3の実施例による波長変換器について説明する。

【0111】図11に示すように、第1の実施例による半導体光増幅器51に、波長 λ_1 の光信号 s_{ig1} 及び波長 λ_2 の光信号 s_{ig2} が入力される。第3の実施例による波長変換器を、図17に示した従来の波長変換器と比較すると、従来の波長変換器の半導体光増幅器210が、第1の実施例による半導体光増幅器51に置き換え

られただけであり、その他の基本的な構成は変わらない。

【0112】光信号 s_{ig_1} が半導体光増幅器 51 に入力されると、図 9 に示したスペクトルホールが形成される。エネルギー空間におけるスペクトルホールの広がりは、波長 λ_2 の光信号 s_{ig_2} のエネルギーまで及ぶ。このため、光信号 s_{ig_1} のパルスが入力されると、光信号 s_{ig_2} の利得が減少する。これにより、光信号 s_{ig_2} の出力強度が低下し、光信号 s_{ig_1} の波形を反転させた波形が得られる。

【0113】第 3 の実施例の場合には、利得応答速度の速い第 1 の実施例による半導体光増幅器 51 が用いられているため、従来は困難であった 2 Gb/s 以上の光信号の波長変換を行うことができる。第 3 の実施例による波長変換器は、ビットレートが 10 Gb/s 以上、特に、 40 Gb/s 以上の光信号の波長変換に適している。波長 λ_2 の光信号 s_{ig_2} のエネルギーが、光信号 s_{ig_1} のスペクトルホールに含まれるには、波長 λ_1 と λ_2 との光のエネルギー差が、量子ドットの利得の均一幅（室温で約 $10 \sim 20 \text{ meV}$ ）よりも小さいことが必要になる。

【0114】次に、図 12 を参照して本発明の第 4 の実施例による光信号分離装置（デマルチブレクサ）について説明する。

【0115】図 12 は、第 4 の実施例による光信号分離装置のブロック図を示す。第 4 の実施例による光分離装置を、図 21 に示した従来の光分離装置と比較すると、第 1 及び第 2 の半導体光増幅器 210A 及び 210B が、それぞれ第 1 の実施例による半導体光増幅器と同様の構成を有する第 1 及び第 2 の半導体光増幅器 53A 及び 53B に置き換えられている。

【0116】第 1 及び第 2 の半導体光増幅器 53A 及び 53B が、マッハツェンダ型干渉計 52 の 2 本の光路内に挿入されている。図 21 に示した従来の光分離装置では、制御用光信号 s_{ig_3} が、第 1 の半導体光増幅器 210A のみならず、遅延回路を通して第 2 の半導体光増幅器 210B にも入力されていた。このような構成としたのは、既に説明したように、半導体光増幅器の利得の応答特性の低さを補償するためである。

【0117】第 4 の実施例では、利得の応答特性の優れた半導体光増幅器 53A 及び 53B が用いられているため、制御信号 s_{ig_3} を第 2 の半導体光増幅器 53B に入力する必要がない。第 4 の実施例による光信号分離装置のその他の構成は、図 21 に示した従来の光信号分離装置の構成と同様である。また、制御信号 s_{ig_3} 及び光信号 s_{ig_4} も、図 21 に示した従来の場合と同様である。

【0118】第 1 の半導体光増幅器 53A から出力された光信号 s_{ig_5} のチャンネル #2 のパルスの位相が π だけずれる。第 1 の半導体光増幅器 53A の応答速度が

速いため、チャンネル #3 及び #4 のパルスは、制御信号 s_{ig_3} のパルスの影響を受けない。このため、チャンネル #3 及び #4 のパルスの位相は変化しない。第 2 の半導体光増幅器 53B から出力された光信号 s_{ig_6} の各パルスの位相も変化しない。光信号 s_{ig_5} と s_{ig_6} とが干渉することにより、一方の出力導波路 54A にチャンネル #1、#3 及び #4 のパルスが現れ、他方の出力導波路 54B にチャンネル #2 のパルスが現れる。

【0119】第 4 の実施例の場合には、制御信号 s_{ig_3} を第 1 の半導体光増幅器 53A にのみ入力すればよいため、装置構成を簡単化できると共に、動作点の調整を容易に行うことができる。第 4 の実施例の光信号分離装置は、例えば 40 Gb/s の 4 つの信号を時分割多重した 160 Gb/s の光信号から、任意の 1 つの 40 Gb/s の光信号を分離することができる。

【0120】次に、図 13 を参照して、本発明の第 5 の実施例による 2R 素子について説明する。

【0121】図 13 (A) は、第 5 の実施例による 2R 素子のブロック図を示す。図 10 に示した第 2 の実施例による半導体光増幅器 50 の前段に光吸収飽和素子 56 が挿入されている。入力光信号が光吸収飽和素子 56 に入力され、その出力光信号が半導体光増幅器 50 に入力される。光吸収飽和素子 56 は、例えば半導体で形成された活性層を含む光導波路で構成される。

【0122】図 13 (B) に、光吸収飽和素子 56 の入出力特性を示す。横軸は入力信号の光強度を表し、縦軸は出力信号の光強度を表す。入力光の強度がしきい値 I_{th} 以下の時は、入力光のほとんどが吸収され、出力信号の光強度がほとんど 0 になる。入力信号の光強度がしきい値 I_{th} を超えると吸収量が飽和するため、出力信号の光強度が急激に増加する。すなわち、光吸収飽和素子 56 は、入力信号のうち強度がしきい値以下の成分を吸収し、しきい値を超えている成分を通過させる。

【0123】入力光信号には、通常バックグラウンドノイズ I_N が含まれる。バックグラウンドノイズ I_N の強度は、光吸収飽和素子 56 のしきい値 I_{th} 以下である。このため、バックグラウンドノイズ I_N は光吸収飽和素子 56 で吸収され、除去される。バックグラウンドノイズ I_N の除去された光信号が半導体光増幅器 50 に入力されるため、増幅及び整形された出力光信号の S/N 比を高めることができる。

【0124】図 14 に示すように、複数の光吸収飽和素子 56 と半導体光増幅器 50 を縦続接続してもよい。このように、複数の素子を縦続接続することにより波形整形効果を高めることができる。なお、光吸収飽和素子 56 と半導体光増幅器 50 を交互に接続する必要はないが、交互に接続することにより、効果をより高めることができるであろう。

【0125】以上実施例に沿って本発明を説明したが、

本発明はこれらに制限されるものではない。例えば、種々の変更、改良、組み合わせ等が可能なことは当業者に自明であろう。

【0126】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、量子ドット内の離散的に分布する状態を占めるキャリアの光学遷移を利用することにより、半導体光増幅器の応答速度を速めることができる。この半導体光増幅器を、光信号の増幅整形素子、波長変換素子、光信号分離装置に適用することにより、応答速度の速い光信号処理装置を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】光通信網の概念図である。

【図2】光ノードの機能ブロック図である。

【図3】第1の実施例による半導体光増幅器の斜視図である。

【図4】だい1の実施例による半導体光増幅器の活性層の断面図、及び量子ドット層のエネルギーバンド図である。

【図5】第1の実施例による半導体光増幅器の利得スペクトルを示すグラフである。

【図6】第1の実施例による半導体光増幅器に光パルスを入力したときの利得の時間変動を示すグラフである。

【図7】第1の実施例による半導体光増幅器に光パルス列を入力したときの利得の時間変動を示すグラフである。

【図8】第1の実施例による半導体光増幅器に光パルス列を入力したときの入力信号及び出力信号の光強度を示すグラフである。

【図9】従来の半導体光増幅器と第1の実施例による半導体光増幅器の動作原理を説明するための利得スペクトルを示すグラフである。

【図10】第2の実施例による光増幅形成装置のブロック図である。

【図11】第3の実施例による波長変換装置のブロック図である。

【図12】第4の実施例による光信号分離装置のブロック図である。

【図13】第5の実施例による光信号増幅整形装置のブロック図、及びそれに用いられている光吸収飽和素子の入出力特性を示すグラフである。

【図14】第5の実施例の変形例による光信号増幅整形装置のブロック図である。

【図15】従来の半導体光増幅器の斜視図である。

【図16】従来の光増幅整形装置のブロック図である。

【図17】従来の波長変換装置のブロック図である。

【図18】従来の半導体光増幅器に光パルスを入力したときの利得の時間変動を示すグラフである。

【図19】従来の半導体光増幅器に光パルス列を入力したときの利得の時間変動を示すグラフである。

【図20】従来の半導体光増幅器に光パルス列を入力したときの入力信号及び出力信号の光強度を示すグラフである。

【図21】従来の光信号分離装置のブロック図である。

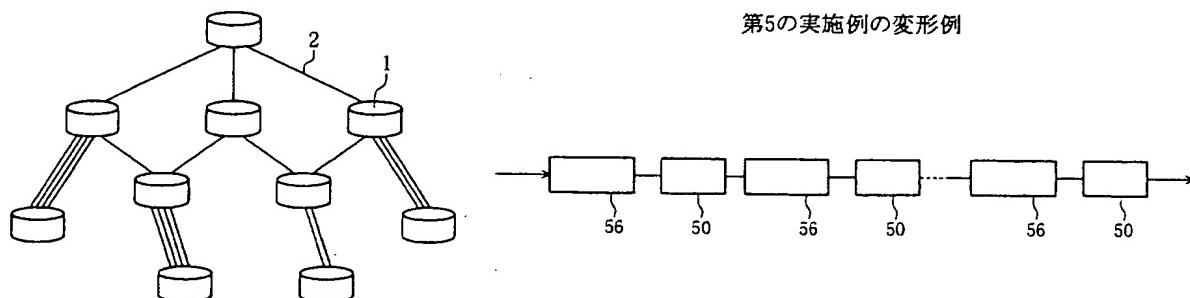
【符号の説明】

- | | |
|-----|-----------------------|
| 1 | 光ノード |
| 2 | 光伝送路 |
| 5 | 再生機能ブロック |
| 6 | 光増幅器 |
| 10 | 7 波形整形器 |
| | 8 リタイミング装置 |
| | 9 クロック抽出器 |
| 10 | 10 ドロップ機能ブロック |
| | 11 パルス分岐装置 |
| 12 | 12 ヘッダ解読器 |
| | 13 遅延メモリ |
| 14 | 14 デマルチブレクサ |
| 20 | 20 アド機能ブロック |
| | 21 光ゲート |
| 22 | 22 マルチブレクサ |
| | 23 ヘッダ形成器 |
| 24 | 24 波長変換装置 |
| | 25 ルーティング機能ブロック |
| 30 | 30 n型GaAs基板 |
| | 31 n型GaAsバッファ層 |
| | 32 n型AlGaAsクラッド層 |
| | 33 下側光閉込層 |
| | 34 活性層 |
| 34A | 34A 量子ドット層 |
| 34B | 34B GaAs層 |
| 34C | 34C 量子ドット |
| 34D | 34D ウェッティング層 |
| 35 | 35 上側光閉込層 |
| 36 | 36 p型AlGaAsクラッド層 |
| 37 | 37 p型GaAsコンタクト層 |
| 40 | 40 入射端面 |
| 41 | 41 出射端面 |
| 42 | 42 溝 |
| 43 | 43 リッジ |
| 44 | 44 絶縁膜 |
| 45 | 45 p側電極 |
| 46 | 46 n側電極 |
| 50 | 50、51、53A、53B 半導体光増幅器 |
| 52 | 52 マッハツェンダ型干渉計 |
| 54A | 54A、54B 出力導波路 |
| 56 | 56 光吸収飽和素子 |
| 200 | 200 活性層 |
| 201 | 201 p型半導体層 |
| 202 | 202 n型半導体層 |
| 203 | 203 光信号 |

210、210A、210B 半導体光増幅器

211A、211B 出力導波路

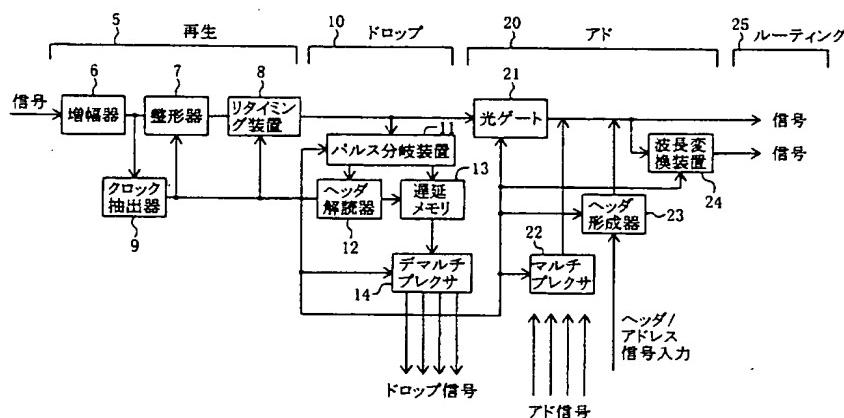
【図1】



【図14】

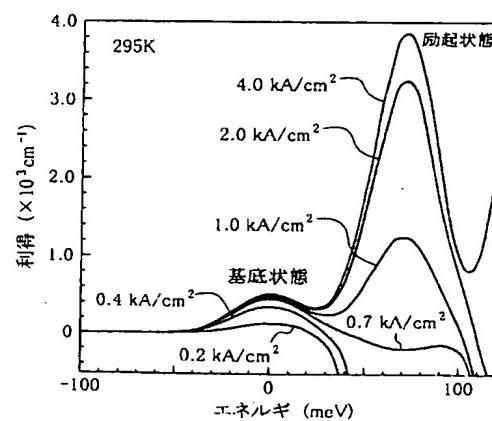
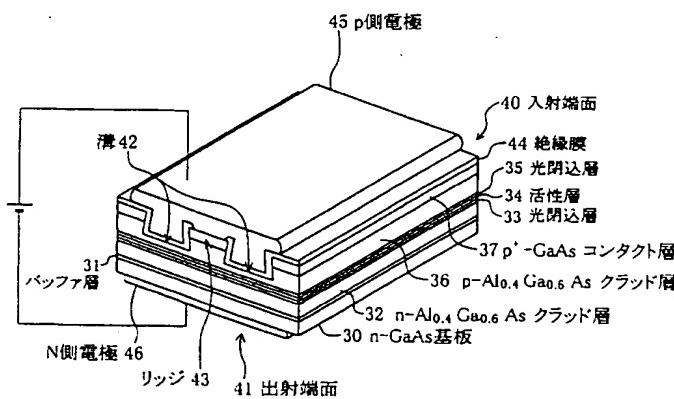
第5の実施例の変形例

【図2】

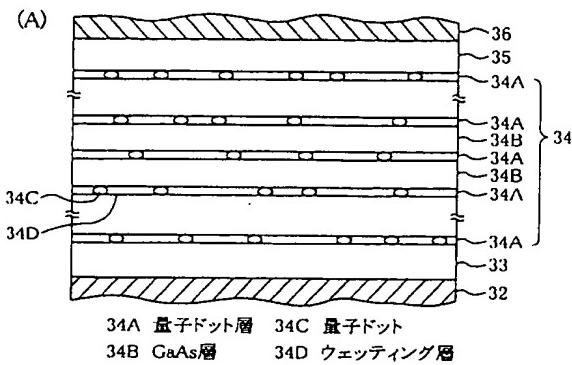


【図5】

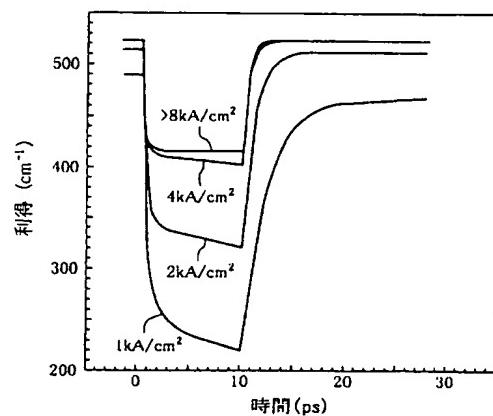
第1の実施例による半導体光増幅器



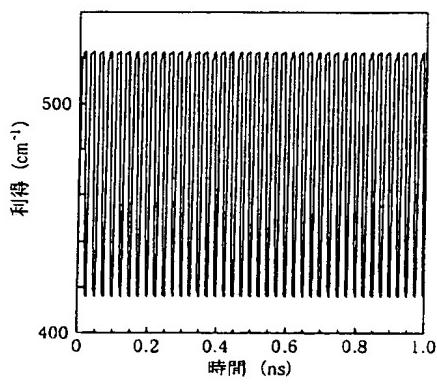
【図4】



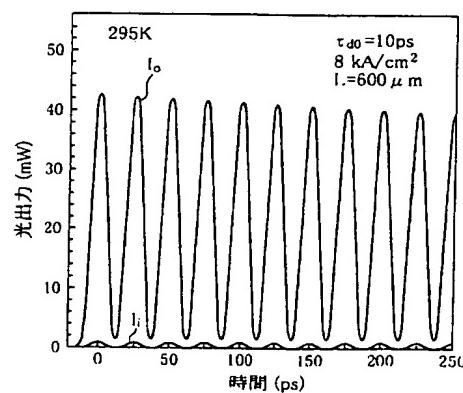
【図6】



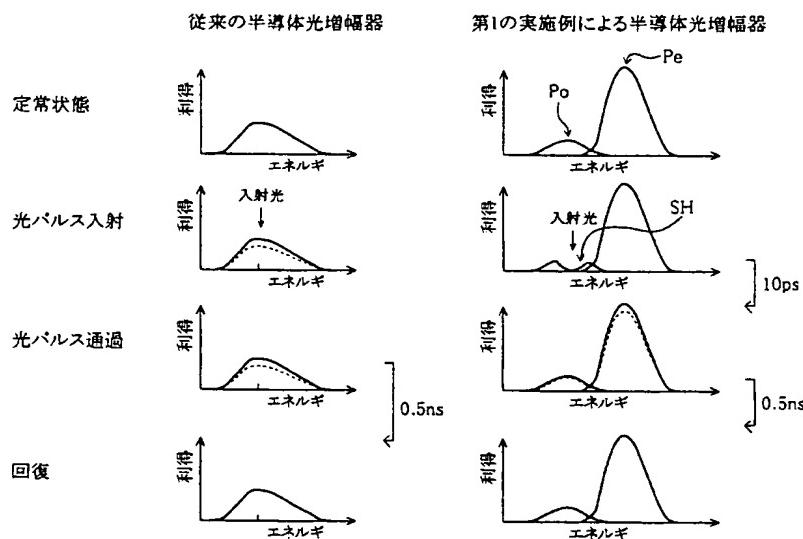
【図7】



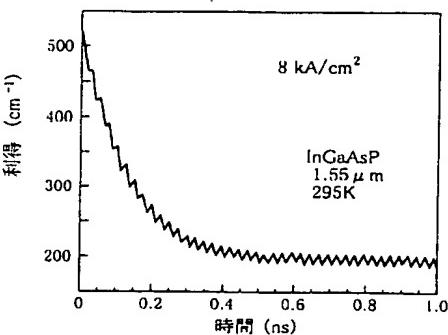
【図8】



【図9】



【図19】

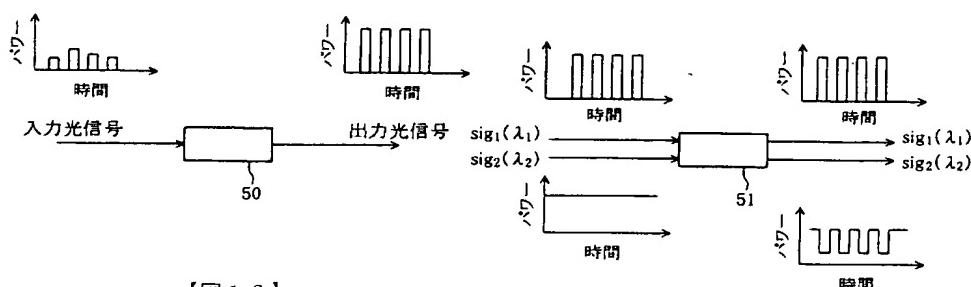


【図10】

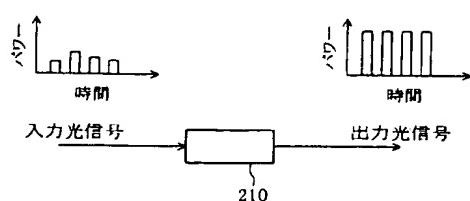
第2の実施例

【図11】

第3の実施例

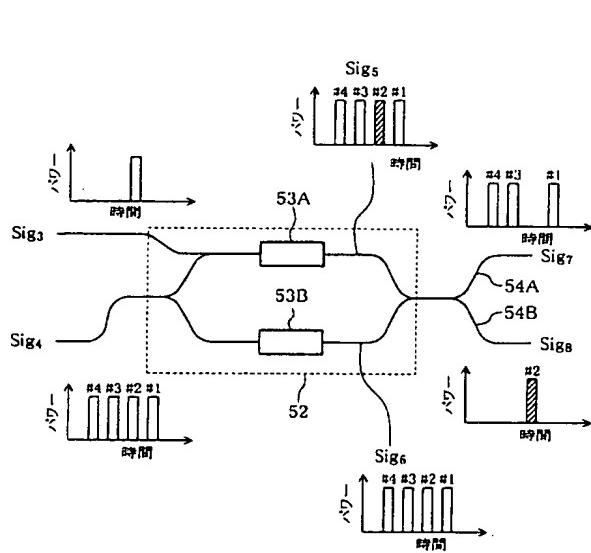


【図16】



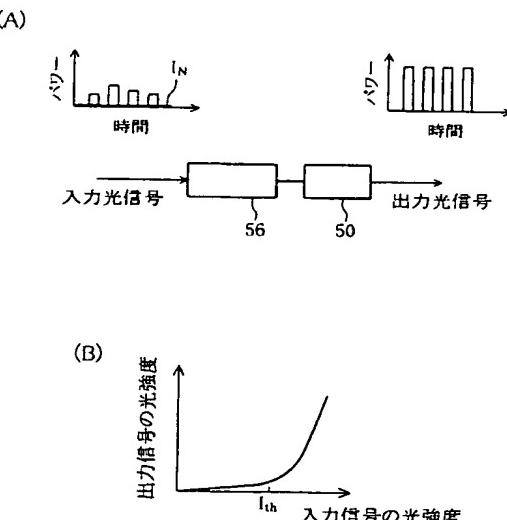
【図12】

第4の実施例



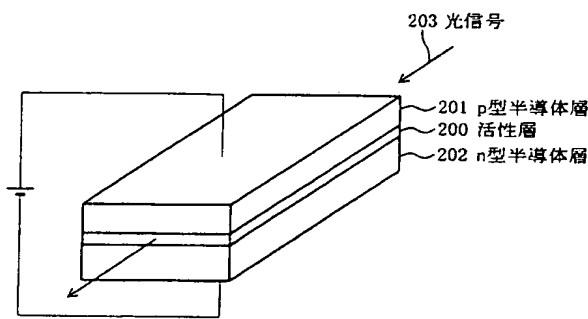
【図13】

第5の実施例

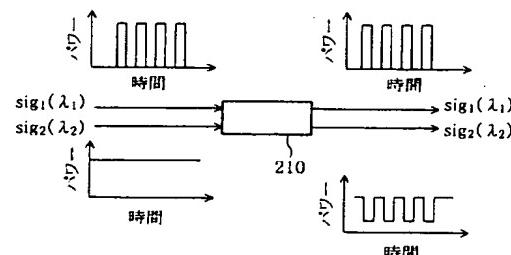


【図15】

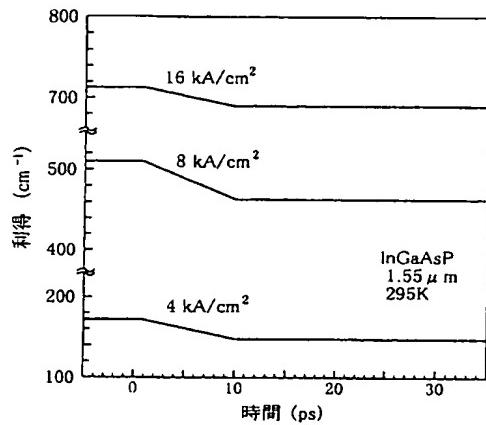
従来例



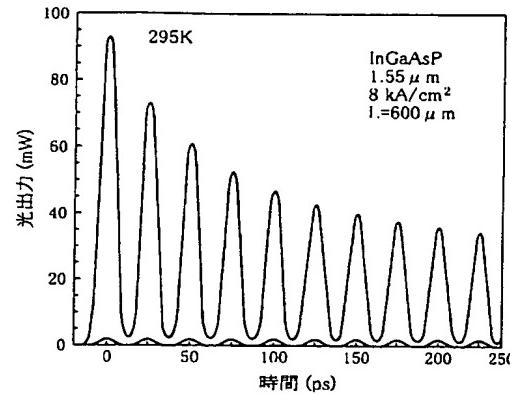
【図17】



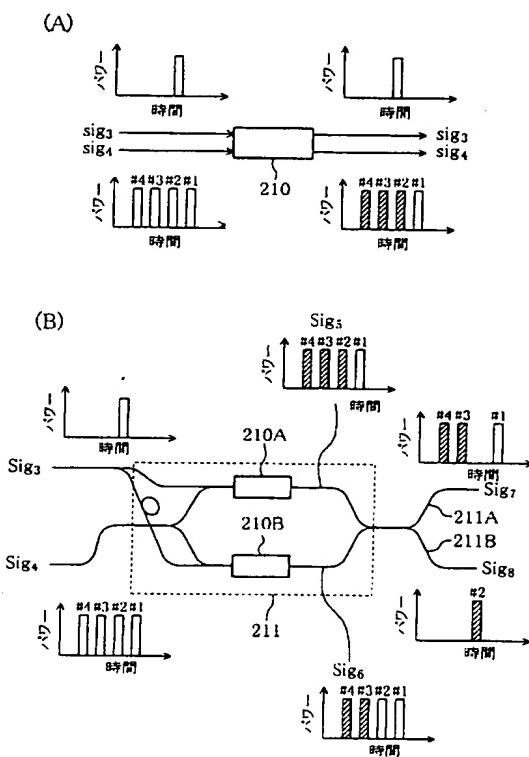
【図18】



【図20】



【図21】



フロントページの続き

(51) Int.C1.⁷
H 0 4 B 10/00

識別記号

F I
H 0 4 B 9/00

テマコト(参考)
B

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB05 BA02 CA13 DA07
DA08 DA12 DA20 EA28 HA30
5F073 AA22 AA45 AA75 AB21 BA01
CA04 DA06
5K002 AA06 BA02 CA05 CA13 DA05